

УДК 624.15.001

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ, ОБРАЗОВАННЫХ В ХОДЕ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ОСНОВАНИЕМ И ЧЕТЫРЬМЯ U-ОБРАЗНЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ ТЕПЛОВОГО НАСОСА КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

*Б.В. Моркляник, Львовская политехника, Украина*

*В.С. Андреев, Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта, Украина*

*А.С. Фартушный, В.Г. Шаповал, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Украина*

**Аннотация.** Разработана методика расчета температурных полей, обусловленных теплообменом между u-образными зондами тепловых насосов и грунтовыми основаниями при учете сезонных изменений температуры на поверхности основания. Показано, что при работе теплового насоса в режиме кондиционирования температура основания может превышать ее природные сезонные значения.

**Введение.** Структура не возобновляемых полезных ископаемых Украины (уголь, уран и др.) такова, что в ближайшие десятилетия наиболее распространенным и доступным источником тепловой энергии будет электрическая. В связи с этим представляет интерес использование в качестве отопительного прибора грунтового теплового насоса. Этот прибор при своей работе потребляет, в основном, накопленную грунтовой толщей энергию Солнечного тепла и лишь малую часть электрической энергии.

**Состояние вопроса, выделение нерешенной части проблемы.** U-образные зонды грунтовых тепловых насосов являются одним из основных типов теплообменников [1]. В этой связи в литературе имеется большое число публикаций [2, 3]. При этом не уделялось внимание разработке методики расчета температурных полей, обусловленных теплообменом между U-образными коллекторами тепловых насосов конечной длины и грунтовыми основаниями. При функционировании U-образных зондов в теплообмен вовлекаются значительные объемы грунта. Этот факт обязательно следует учитывать при проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений.

**Формулирование целей, постановка задач.** При написании настоящей работы преследовалась цель определить методику расчета температурного поля в основании U-образного коллектора теплового насоса конечных размеров.

**Изложение основного материала.** Рассмотрим задачу о распределении температурных полей в основании четырех U-образных коллекторов, длина которых равна 25 метров, работающего в режимах кондиционирования, отопления а также в реверсном режиме плоского теплового насоса (рис. 1).

В качестве исходных прием изложенные в таблице 1 данные.

Таблица 1

Значения теплофизических свойств основания

| №<br>Пп | Удельный<br>вес $\gamma \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ | Удельная теплоем-<br>кость $c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ | Кэфф. Теплопровод-<br>ности $\lambda, \frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ |
|---------|---|--|---|
| 1       | 15,50...20<br>,00                                     | 0,50...2,00  | 0,50...2,00   |

Далее рассчитаем тепловое поле в грунтовом основании U-образного зонда длиной  $h$  и радиусом  $R$ . При этом не будем учитывать обусловленные природными условиями колебания температуры. В качестве фундаментального используем полученное нами решение (формула (64) в работе [4]).

Далее положим в (64)  $dQ = q_w(\tau) \cdot \eta_1 \cdot d\eta_1 \cdot d\xi$ , а вместо радиуса  $r$  подставим разность расстояний между радиусом  $\eta_1$ , на расстоянии которого от центра находится рассматриваемая точка и радиусом  $r$ , на расстоянии которого от центра производится расчет температурного поля. После этого проинтегрируем полученное таким образом выражение в пределах  $\xi \in (0, h)$  и  $\eta_1 \in (0, R)$ . Имеем:

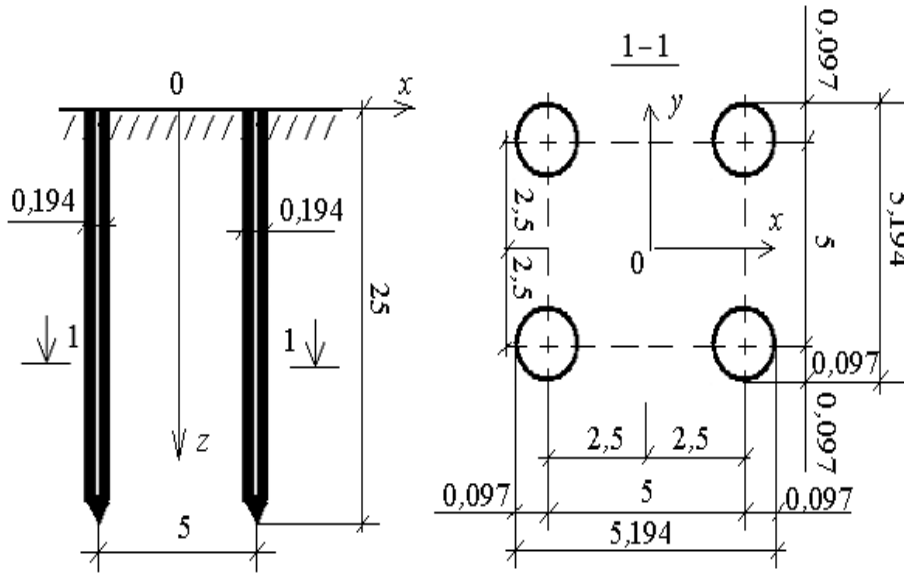


Рис. 1. К расчету теплового поля в основании четырех U-образных зондов  
Примечание. Размеры даны в метрах.

$$T_U(r, z, t) = \int_0^h \left\langle \int_0^R \int_0^t \{k(\tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau\} \cdot \eta_1 \cdot d\eta_1 \right\rangle d\xi; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \exp \left[ -\frac{(r - \eta_1)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \quad f_1 = \exp \left[ -\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\ f_2 &= \exp \left[ -\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \quad k(\tau) = \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p \cdot \sqrt{(\pi \cdot a \cdot t)^3}}. \end{aligned} \right\}$$

Выполнив в (1) процедуру интегрирования, найдем:

$$T_U(r, z, t) = \int_0^t k(t, \tau) \cdot [f_1 \cdot (f_2 + f_3) + f_4 \cdot (f_5 + f_6)] \cdot (f_6 + f_6 + f_6) d\tau; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= 2 \cdot a \cdot (t - \tau); \quad f_2 = \exp\left(-\frac{r^2}{a_1}\right); \quad f_3 = -\exp\left[-\frac{(R-r)^2}{a_1}\right]; \\ f_4 &= r \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t - \tau)}; \quad f_5 = \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_6 = \operatorname{erf}\left(\frac{R-r}{\sqrt{a_1}}\right); \\ f_7 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{z-h}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_8 = -\operatorname{erf}\left(\frac{z+h}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_9 = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{a_1}}\right); \\ a_1 &= 4 \cdot a \cdot (t - \tau); \quad k(t, \tau) = \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot a \cdot (t - \tau) \sqrt{\pi}}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Далее перейдем к декартовой системе координат. Для этого положим в (2)  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ .  
Имеем:

$$\left. \begin{aligned} T_U(x, y, z, t) &= \int_0^t k(t, \tau) \cdot \left[ \begin{aligned} &f_1 \cdot (f_2 + f_3) + \\ &+ f_4 \cdot (f_5 + f_6) \end{aligned} \right] \cdot (f_6 + f_7 + f_8) d\tau; \\ f_1 &= 2 \cdot a \cdot (t - \tau); \quad f_2 = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a_1}\right); \\ f_3 &= -\exp\left[-\frac{\left(R - \sqrt{x^2 + y^2}\right)^2}{a_1}\right]; \\ f_4 &= r \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t - \tau)}; \quad f_5 = \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{a_1}}\right); \\ f_6 &= \operatorname{erf}\left(\frac{R - \sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_7 = -\operatorname{erf}\left(\frac{z-h}{\sqrt{a_1}}\right); \\ f_8 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{z+h}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_9 = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{a_1}}\right); \quad a_1 = 4 \cdot a \cdot (t - \tau); \\ k(t, \tau) &= \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot a \cdot (t - \tau) \sqrt{\pi}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Температуру основания в расчетной точке основания с координатами  $(x, y, z)$  найдем как сумму

$$T(x, y, z, t) = T_U(x, y, z, t) + T(z, t) \quad (4)$$

Здесь  $T_U(x, y, z, t)$  – температура в точке основания с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ , обусловленная теплообменом основания с и-образным зондом (ее следует рассчитывать с использованием рекомендаций [4, 5]), а  $T(z, t)$  – температура на глубине  $z$  в момент времени  $t$ , обусловленная теплообменом основания с окружающей средой.

На основе полученных таким образом данных нами были построены изополя температур в грунтовом основании для таких вариантов использования тепловых насосов:

- тепловой насос работает только лишь в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа (рис. 2);
- тепловой насос работает только лишь в режиме отопления шесть месяцев с начала ноября по конец марта (рис. 3);
- тепловой насос работает в реверсном режиме (т.е. в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа и в режиме отопления – шесть месяцев с начала ноября по конец марта рис. 4).

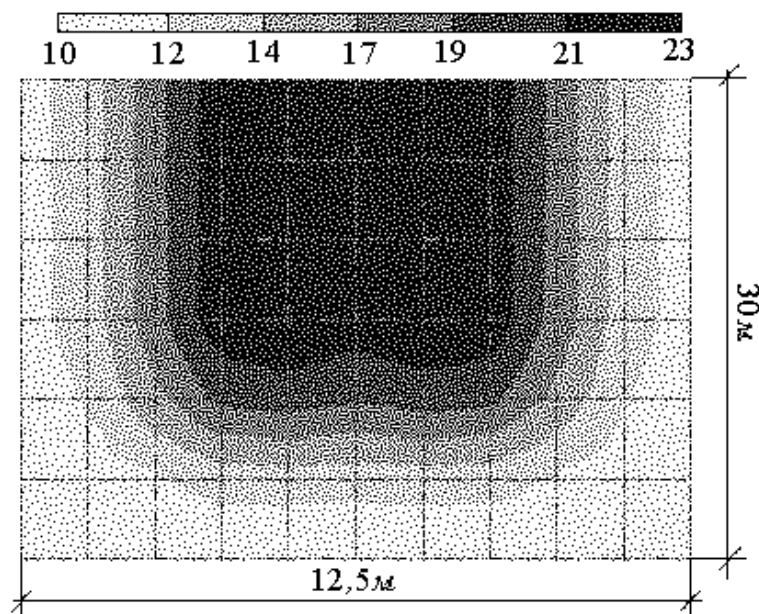


Рис. 2. Температурное поле в грунтовом основании, обусловленное теплообменом четырех U-образных зондов с основанием при работе теплового насоса в режиме кондиционирования в течение 3 месяцев

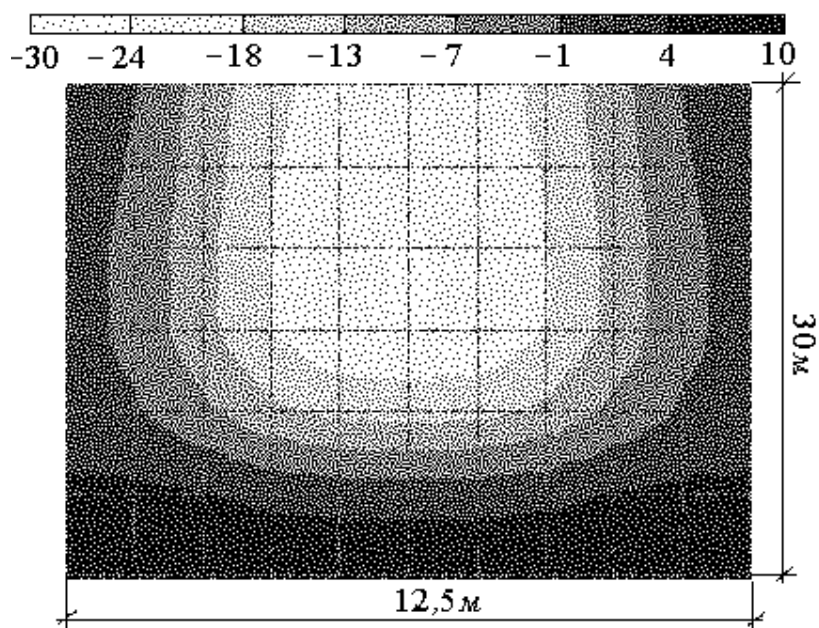


Рис. 3. Температурное поле в грунтовом основании, обусловленное теплообменом четырех U-образных зондов с основанием при работе теплового насоса в режиме отопления в течение 6 месяцев

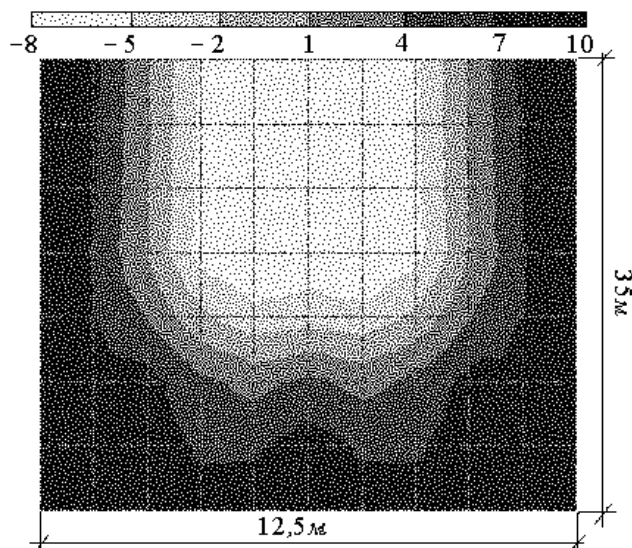


Рис. 4. Температурное поле в грунтовом основании, обусловленное теплообменом четырех U-образных зондов с основанием при работе теплового насоса в режиме кондиционирования в течение 3 месяцев и в режиме отопления в течение 6 месяцев

Изложенные в настоящем разделе материалы исследований, позволили нам сделать такие выводы.

1. Разработана методика расчета температурных полей, обусловленных теплообменом между U-образными зондами тепловых насосов и грунтовыми основаниями при учете сезонных изменений температуры на поверхности основания.

2. Показано, что при работе теплового насоса в режиме кондиционирования температура основания может превышать ее природные сезонные значения (рис. 2).

3. Установлено, что при работе теплового насоса в режиме отопления температура основания может быть ниже температуры замерзания воды (рис. 3). Этот факт имеет важное значение при проектировании фундаментов и подземных сооружений в связи с явлением морозного пучения грунта[6].

4. Выявлено, что тепловые поля при работе теплового насоса в режиме отопления и в реверсном режиме отличаются друг от друга (рис. 3 и 4).

5. Установлено, что при функционировании U-образных зондов в теплообмен вовлекаются значительные объемы грунта. Этот факт обязательно следует учитывать при проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шаповал В.Г., Моркляник Б.В. Основания и фундаменты тепловых насосов. Львов: Сполом - 2009 – 64 с.
2. Brandl, H. Energy foundation and other thermo- active ground structures. Geotechnique 56.- 2006.- pp. 81-122.
3. Brandl, H. Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground. Procceeding of the 3-h international Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Ghent. Technical University, Vienna, Austria-1998.-pp. 38-60.
4. Шаповал В.Г., Моркляник Б. В. Температурные поля в основаниях тепловых насосов: Монография.- Дніпропетровск: Пороги, 2011.- 123 с.
5. Шаповал В.Г., Моркляник Б.В. Закономерности изменения во времени температуры на дневной поверхности грунтовых оснований. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2010, №28.- с. 298-302.
6. Шаповал В.Г., Седин В.Л., Шаповал А.В., Моркляник Б. В., Андреев В.С. Механика грунтов: Учебник.– Днепропетровск: Пороги, 2010.-168 с.